

Solarthermische Brennstoffherzeugung

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
Institut für Solarforschung
Abteilung Solare Verfahrenstechnik

Dr. Christian Sattler

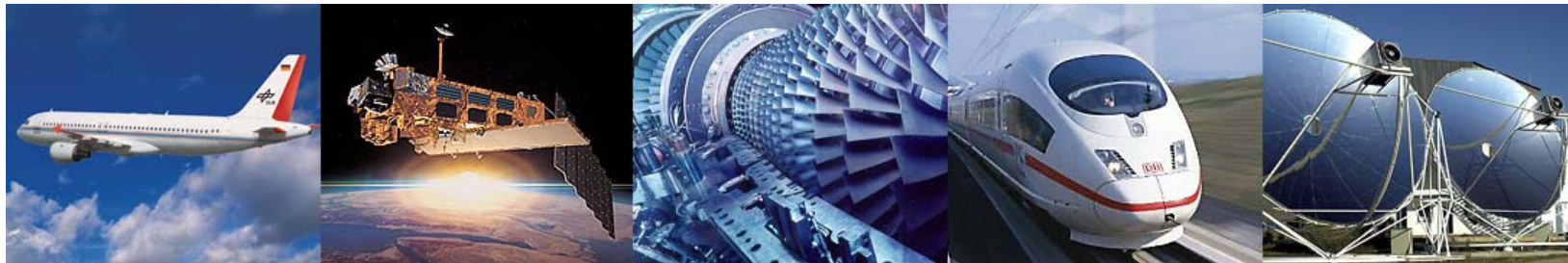


Übersicht

- DLR
- Potential der Solarstrahlung und konzentrierende Solarsysteme
- Motivation für die solarthermische Brennstoffherzeugung: Politisch, wirtschaftlich, ökologisch, technisch
- Entwicklungen und Demonstrationen
- Ausblick und notwendige nächste Schritte



Das DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



- Forschungseinrichtung
- Raumfahrt-Agentur
- Projektträger



Mitwirkung in der Helmholtz-Gemeinschaft

- Erfolg in der programmorientierten Förderung
- Mehrwert aus der Unterstützung der Helmholtz-Gemeinschaft
- Mitgestalten des Organisationsentwicklungsprozesses



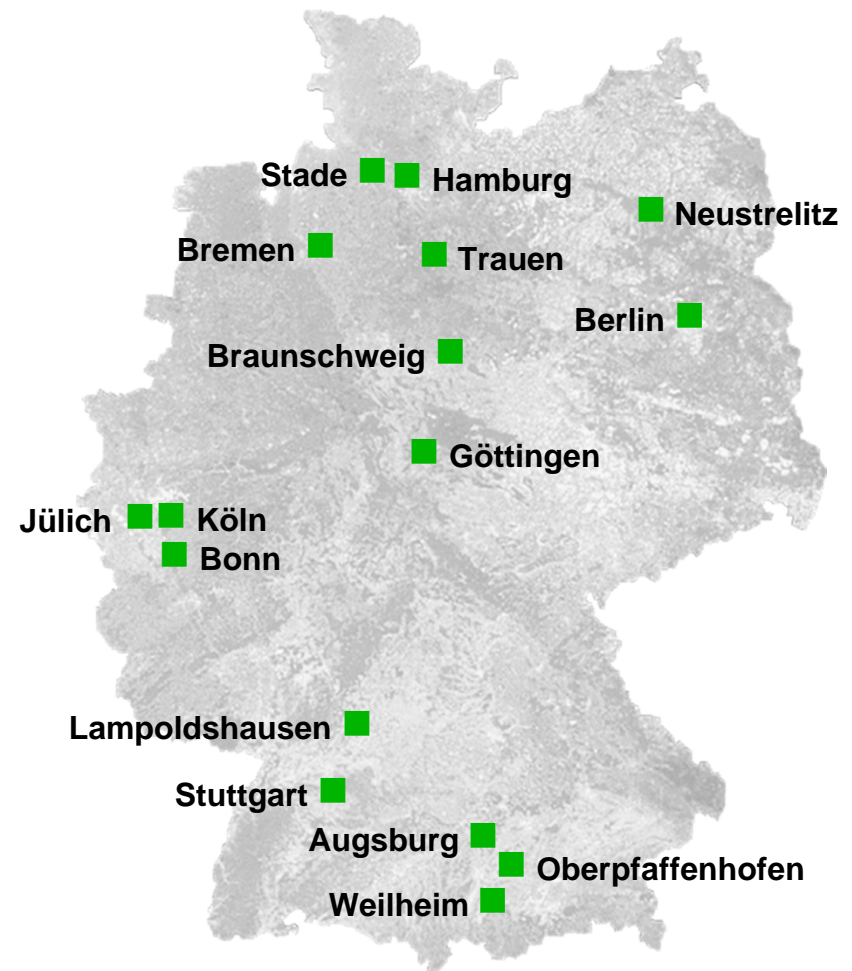
HelmholtzZentrum münchen



Standorte und Personal

Circa 8.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter arbeiten in 33 Instituten und Einrichtungen in
■ 16 Standorten.

Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington.



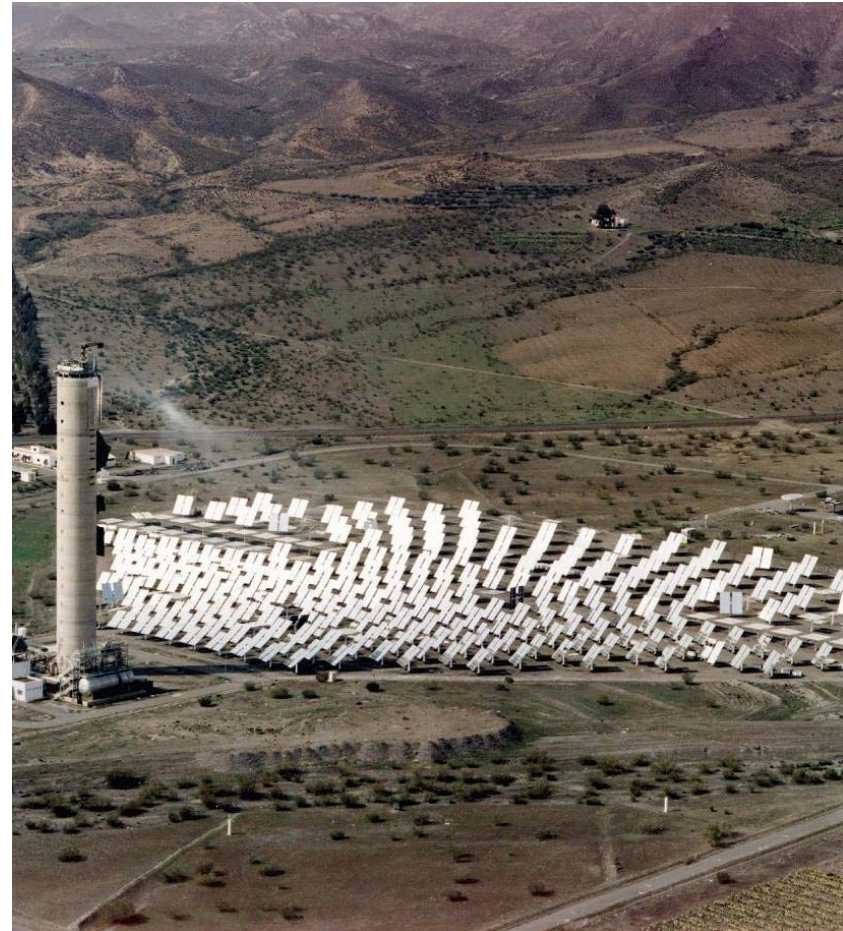
Forschungsbereiche

- Luftfahrt
- Raumfahrtforschung und -technologie
- Verkehr
- **Energie**
- Sicherheit (Querschnittsbereich)
- Raumfahrtmanagement
- Projektträger



Programmenthemen der Energie

- Effiziente und umweltverträgliche „fossile“ Kraftwerke (Turbomaschinen, Brenn-kammern, Wärmeübertrager)
- Solarthermische Kraftwerkstechnik
- **Solare Brennstoffe**
- Thermische sowie chemische Energiespeicher
- Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen
- Batterieforschung
- Systemanalyse und Technikbewertung
- Windenergie



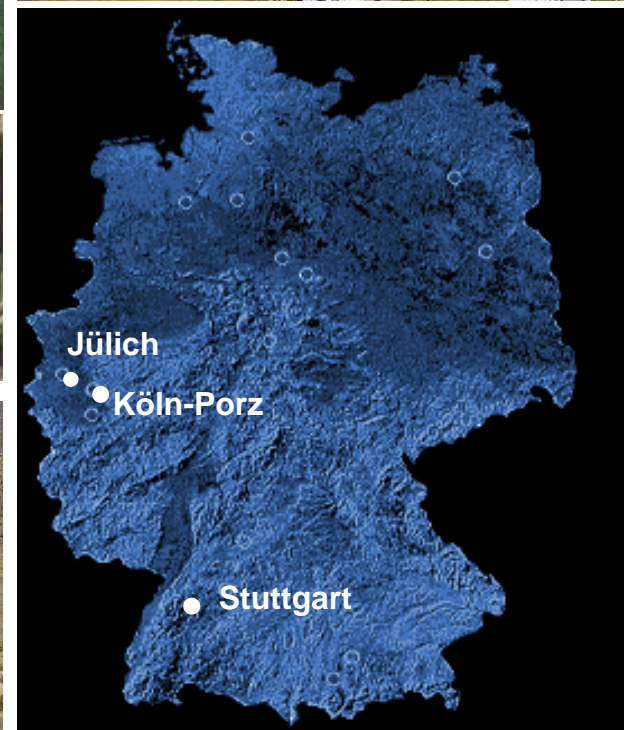
DLR Institut für Solarforschung

- > 120 angestellte Mitarbeiter
- > 20 Doktoranden und PostDocs
- > 30 Studierende
- 4 Standorte

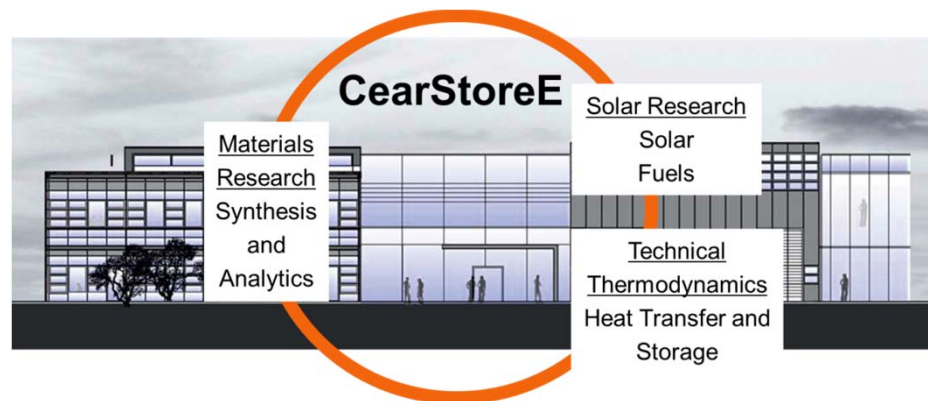
Köln-Porz, Jülich

Stuttgart

**Plataforma Solar de Almería
(Permanente Delegation)
und Büro Almería, Spanien**



Großanlagen des DLR



Solarthermische Chemie

Enge Netzwerke z.B. über

- Das IEA “Solar Power and Chemical Energy Systems” (SolarPACES) Programm

www.solarpaces.org

- Den IEA-HIA Task 35 zur erneuerbaren Wasserstoffherzeugung

- EU STAGE-STE Projekt

www.stage-ste.eu



25 kW_{th} off-axis solar furnace at DLR, Cologne (D)



20 kW_{th} HFSS at DLR, Cologne (D)



50 kW_{th} HFSS at PSI, Villigen (CH)



40 kW_{th} on-axis solar furnace at PSI, Villigen (CH)



40 kW_{th} on-axis solar furnace at KIER, Daejeon (KOR)



25 kW_{th} off-axis solar furnace at NREL, Golden, CO (USA)



16 kW_{th} on-axis solar furnace at Sandia, Albuquerque, NM (USA)



500 kW_{th} solar tower at CSIRO, Newcastle (AUS)



1 MW_{th} solar furnace at Parkent (Uzbekistan)



60 kW_{th} on-axis solar furnace at Plataforma Solar de Almería (E)



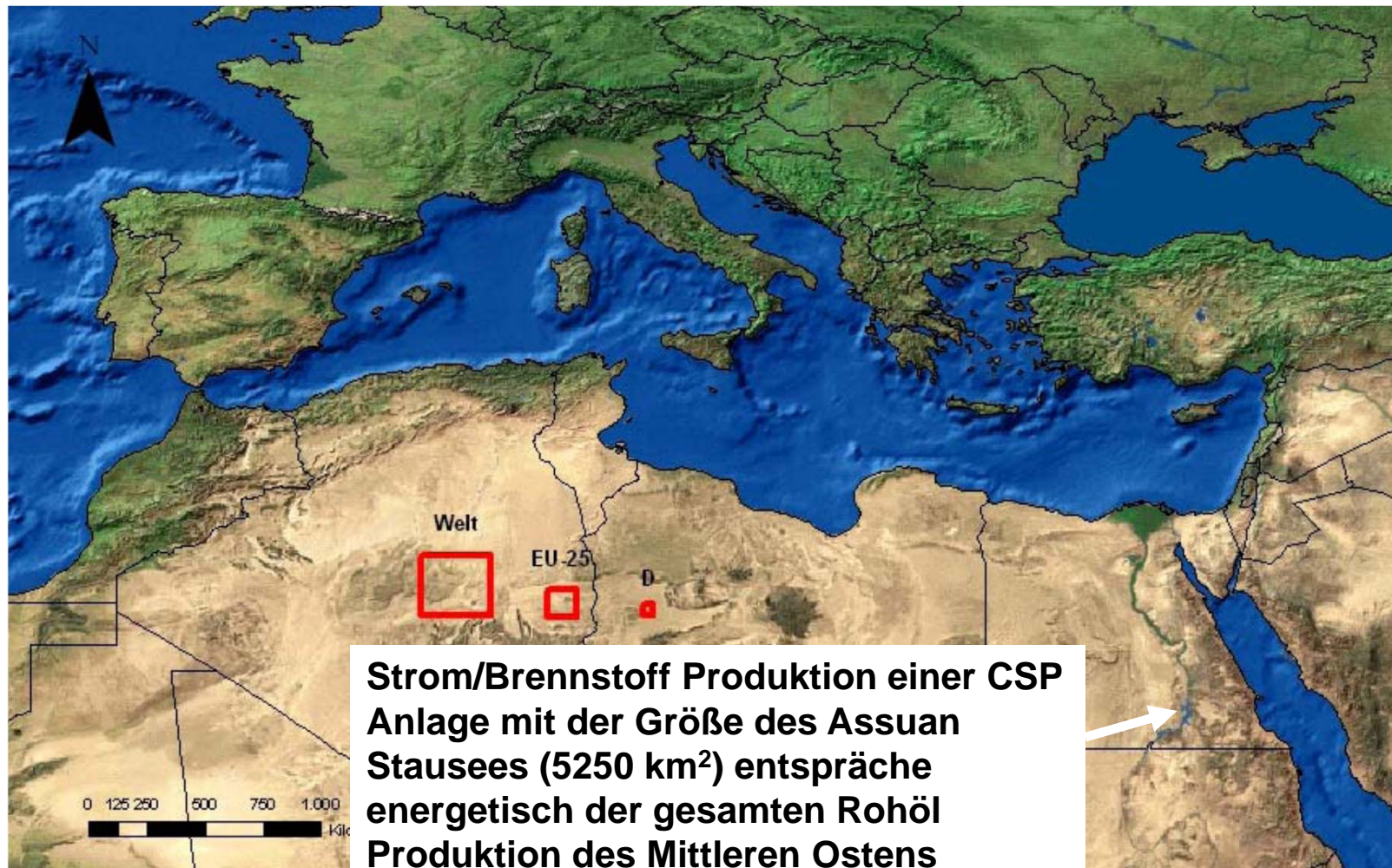
3 MW_{th} solar tower with "beam down" optics at WIS, Rehovot (IL)



1 MW_{th} solar furnace at CNRS-PROMES, Odeillo (F)



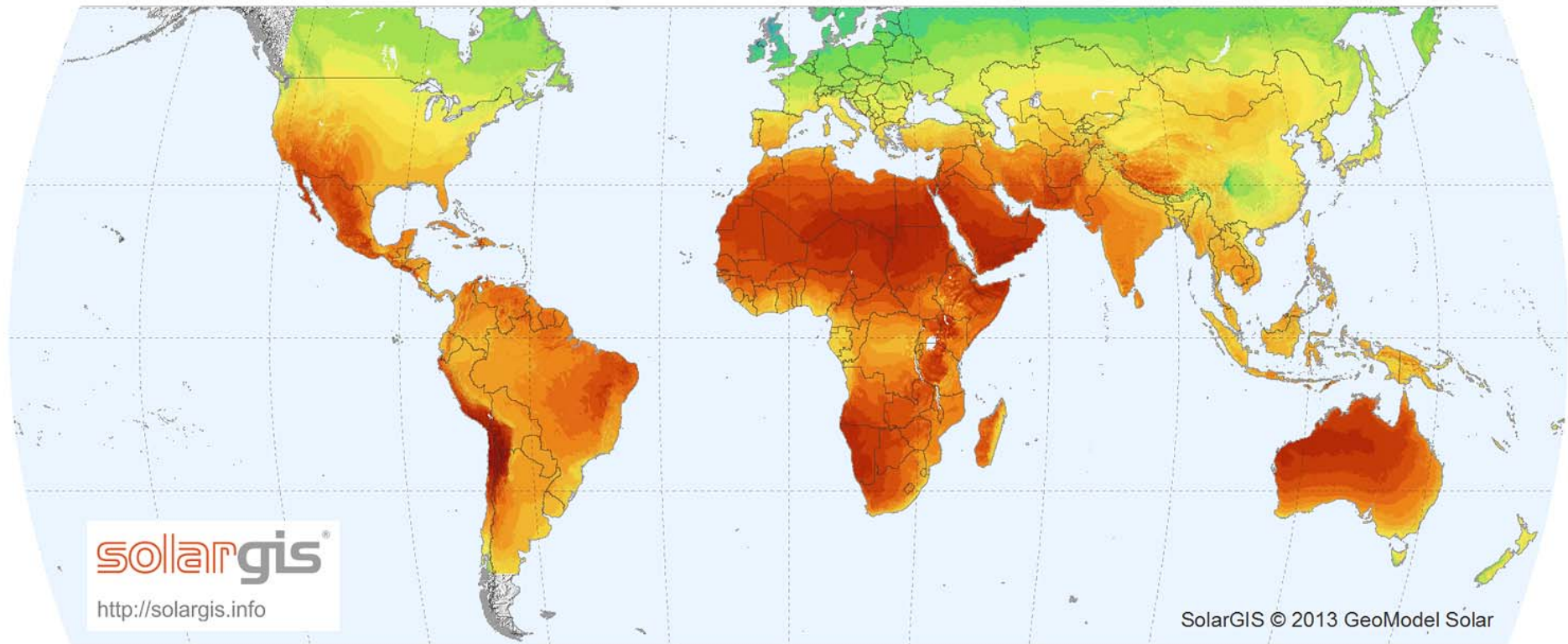
Potential der Solarenergie



Potential der Solarenergie

WORLD MAP OF GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION

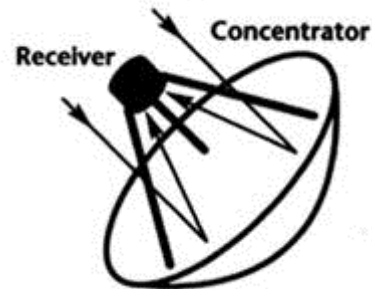
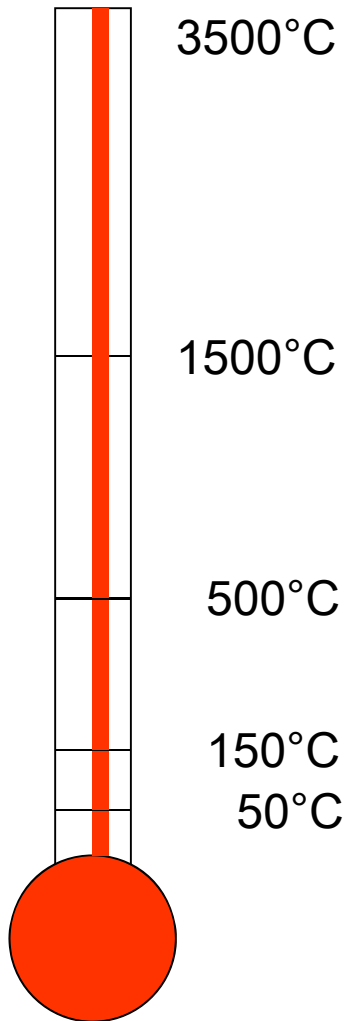
GeoModel
SOLAR



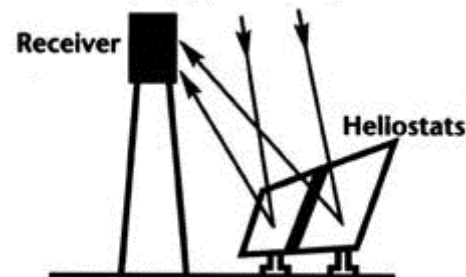
Long-term average of: Annual sum < 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 2100 2300 2500 2700 >
Daily sum < 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 > kWh/m²



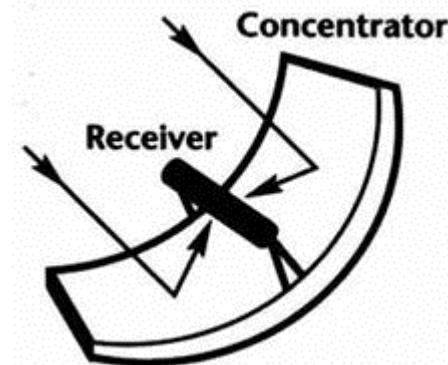
Konzentrierende Solarsysteme



Paraboloid:
„Dish“



Solarturm
Zentralreceiversystem

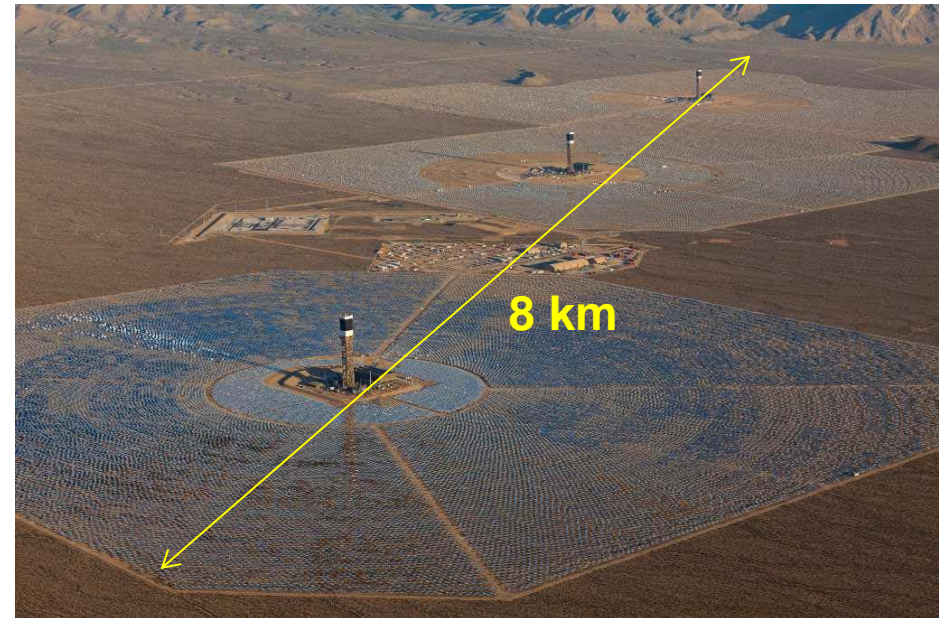


Parabolrinne /
Linear Fresnel



Umwandlungsprozesse – Concentrated Solar Technologies (CST)

- **CSP – Concentrated Solar Power**
 - Umwandlung von Wärme in Strom
- **CSM – Concentrated Solar Materials**
 - Nutzung von Wärme für Materialien
 - Recycling von Aluminium
 - Zementherstellung
 - Stickstoff zu Dünger
- **CSF – Concentrated Solar Fuels**
 - Umwandlung von Wärme in Energievektoren
 - Thermische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff
 - Thermische Spaltung von CO_2 in CO und Sauerstoff
 - Dampfreformierung von Methan zu Synthesegas



Politische Treiber: Beispiel – EU Sustainable Energy Technology Plan (SET-Plan 2007)

- **Ziele der EU bis 2020 (20/20/20)**
 - **20%** höhere Energieeffizienz
 - **20%** weniger THG Emissionen
 - **20%** Erneuerbare Energie
- **Ziele der EU bis 2050:**
 - **80%** weniger CO₂ Emissions als 1990
- “Significant research effort for the development of a new generation of CO₂ emission free energy technologies, like
 - Offshore-Wind
 - **Solar**
 - 2nd generation Biomass”



G7 – Ziele von Elmau

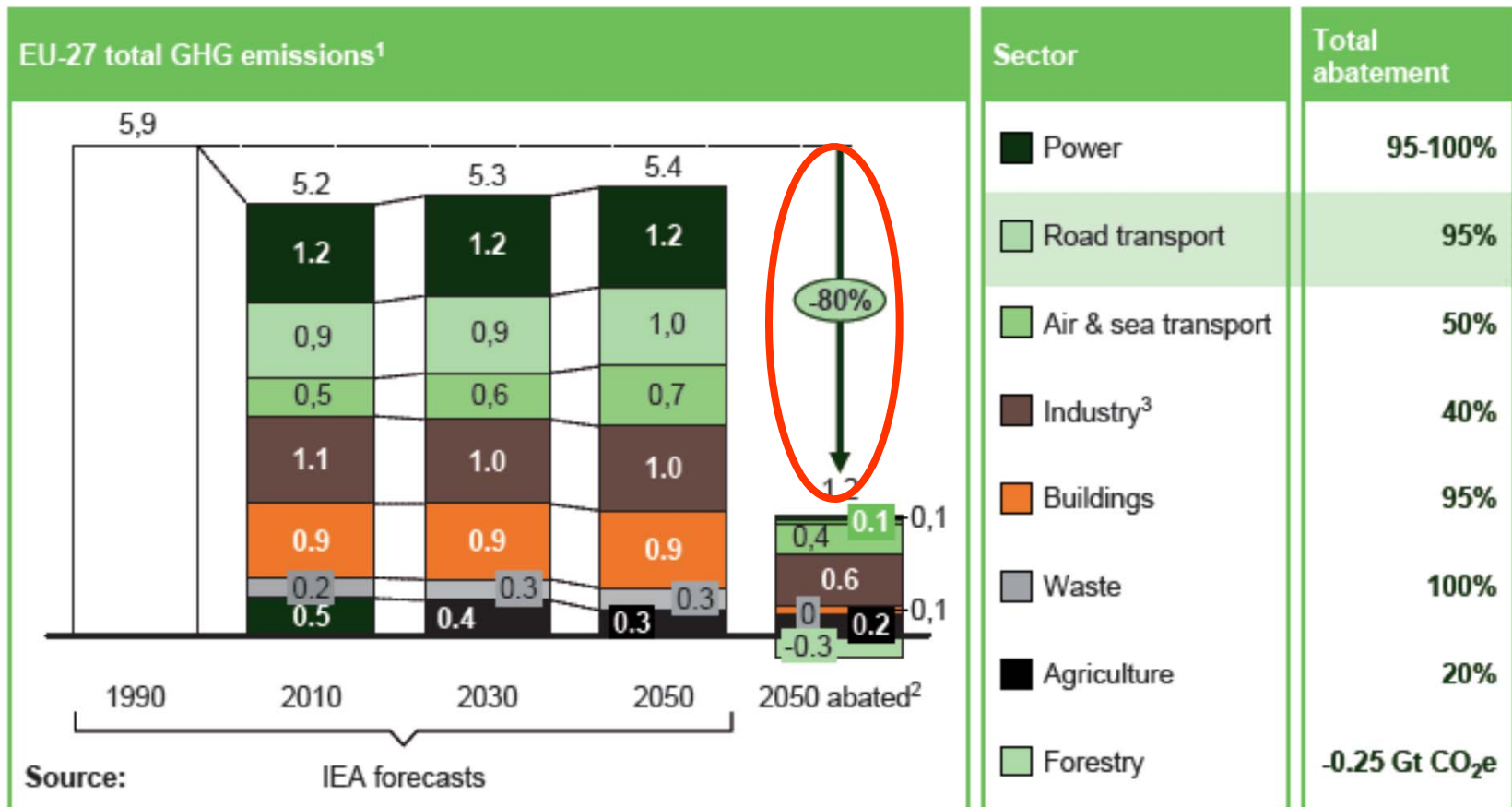
- In diesem Jahrhundert den weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen auf **null** senken.
 - "Wir wissen, dass wir im Laufe des Jahrhunderts eine Dekarbonisierung brauchen", Angela Merkel
- Ab 2020 Klimaschutzzahlungen von jährlich 100 Milliarden Dollar an arme Staaten, wobei Privatfirmen mit Investitionen kräftig helfen sollen



Bilder Wikipedia und Spiegel Online



Entwicklung der EU CO₂ Emissionen [Gt CO₂e]



1 Large efficiency improvements are already included in the baseline based on the International Energy Agency, World Energy Outlook 2009, especially for industry

2 Abatement estimates within sector based on Global GHG Cost Curve

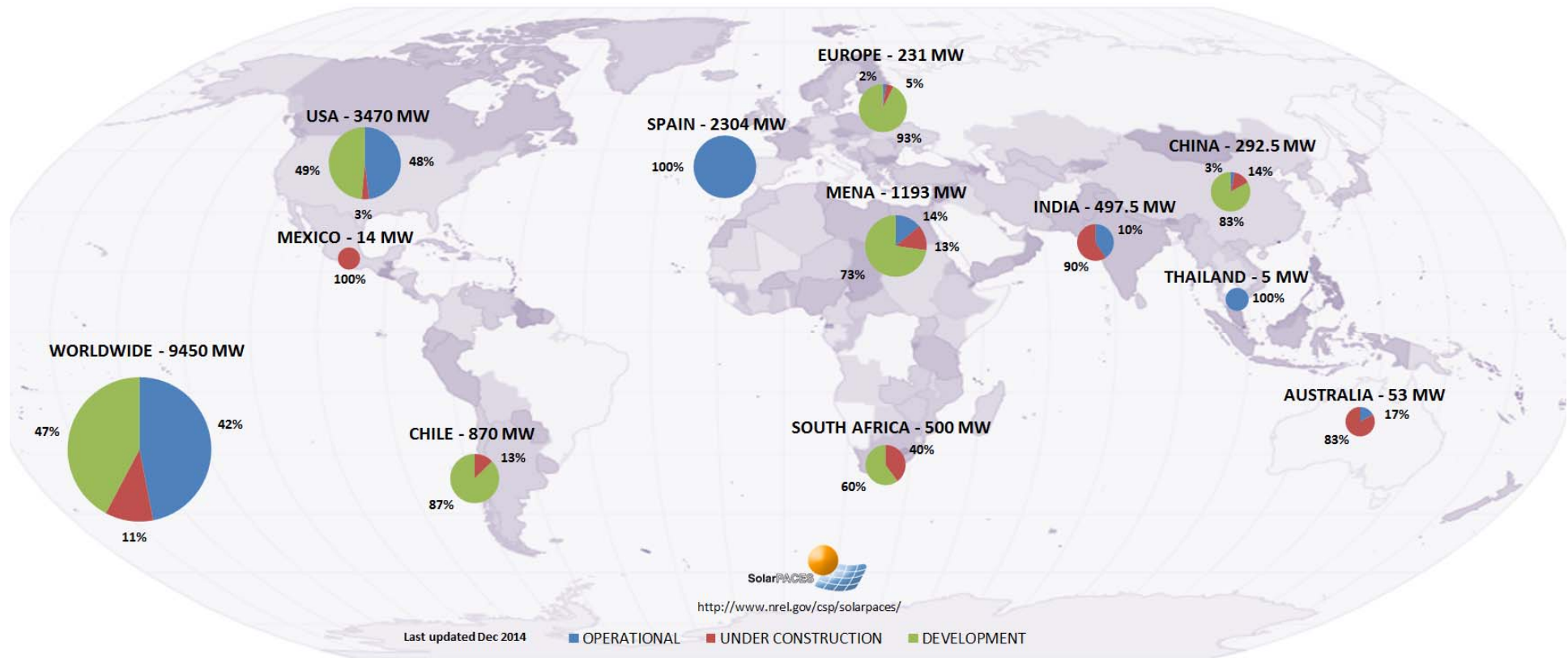
3 CCS applied to 50% of large industry (cement, chemistry, iron and steel, petroleum and gas, not applied to other industries)



SOURCE: www.roadmap2050.eu



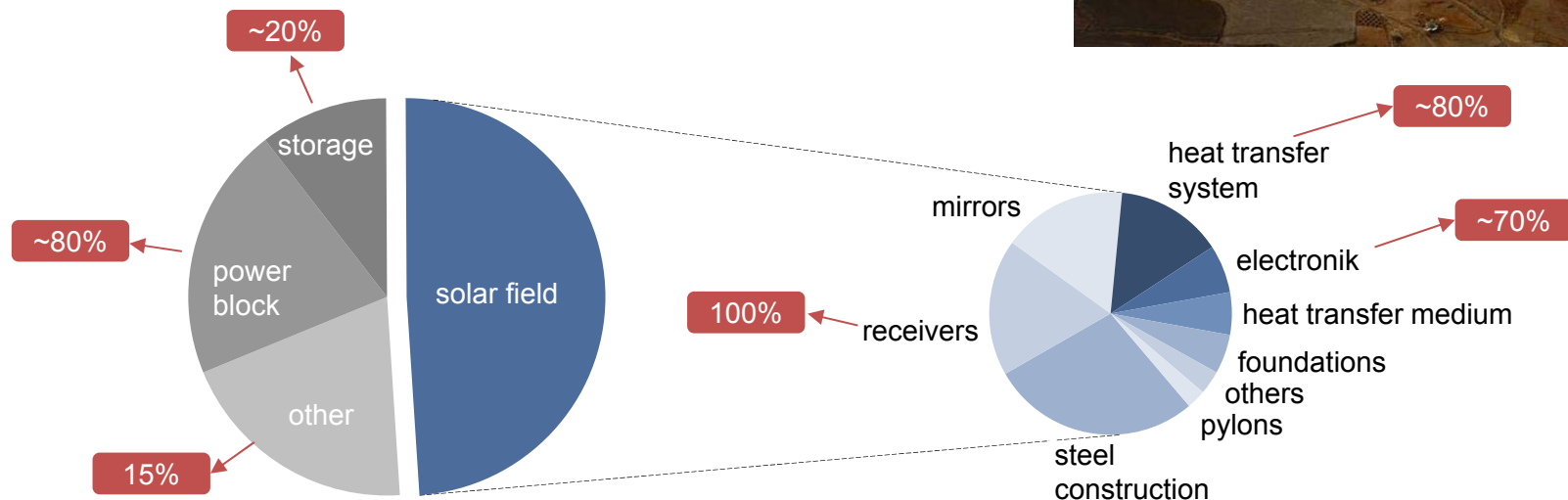
Weltweiter CSP Markt



Lieferanteile Deutscher Unternehmen

Beispiel Andasol 3, Spanien

- 50 MW; 6 h Speicher
- Total Invest ca. 285 m€
- 40 deutsche Unternehmen beteiligt mit einem Gesamtvolumen von ca. 85 Mio. €



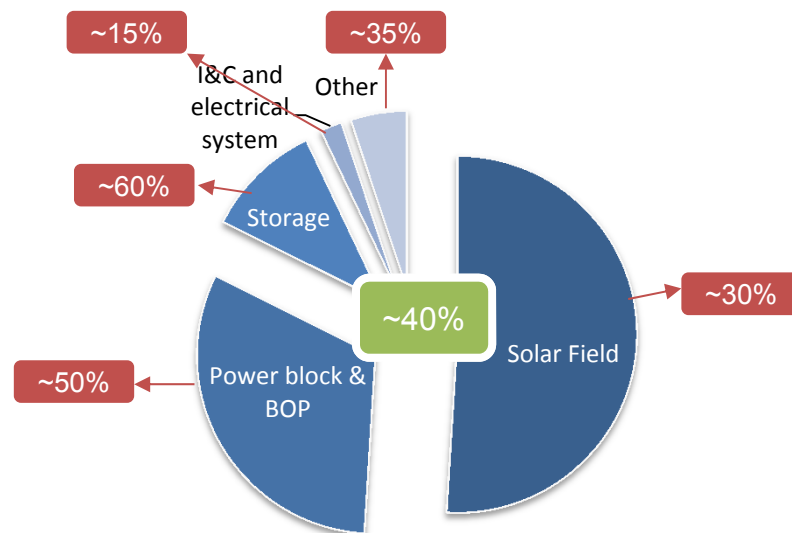
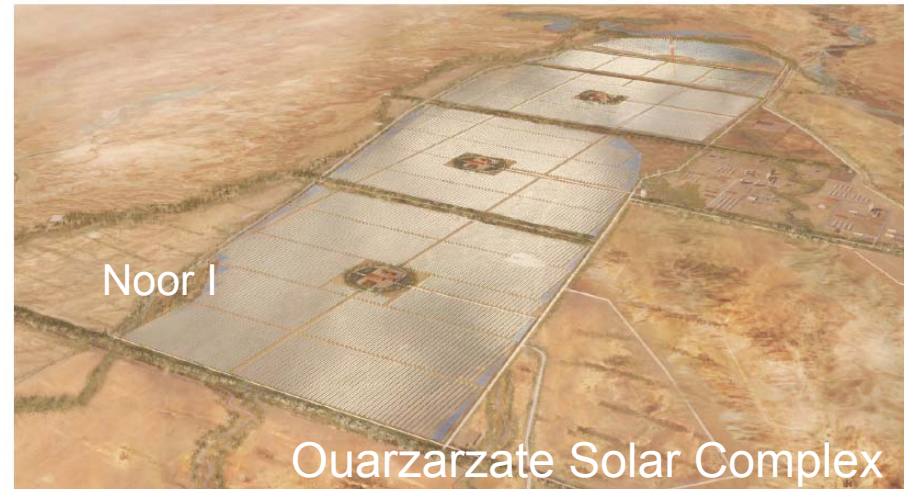
thereof German share



Lieferanteile Deutscher Unternehmen

Beispiel Noor I, Marokko

- 160 MW, 3 h Speicher
- $\approx 40\%$ des EPC von deutschen Unternehmen geliefert

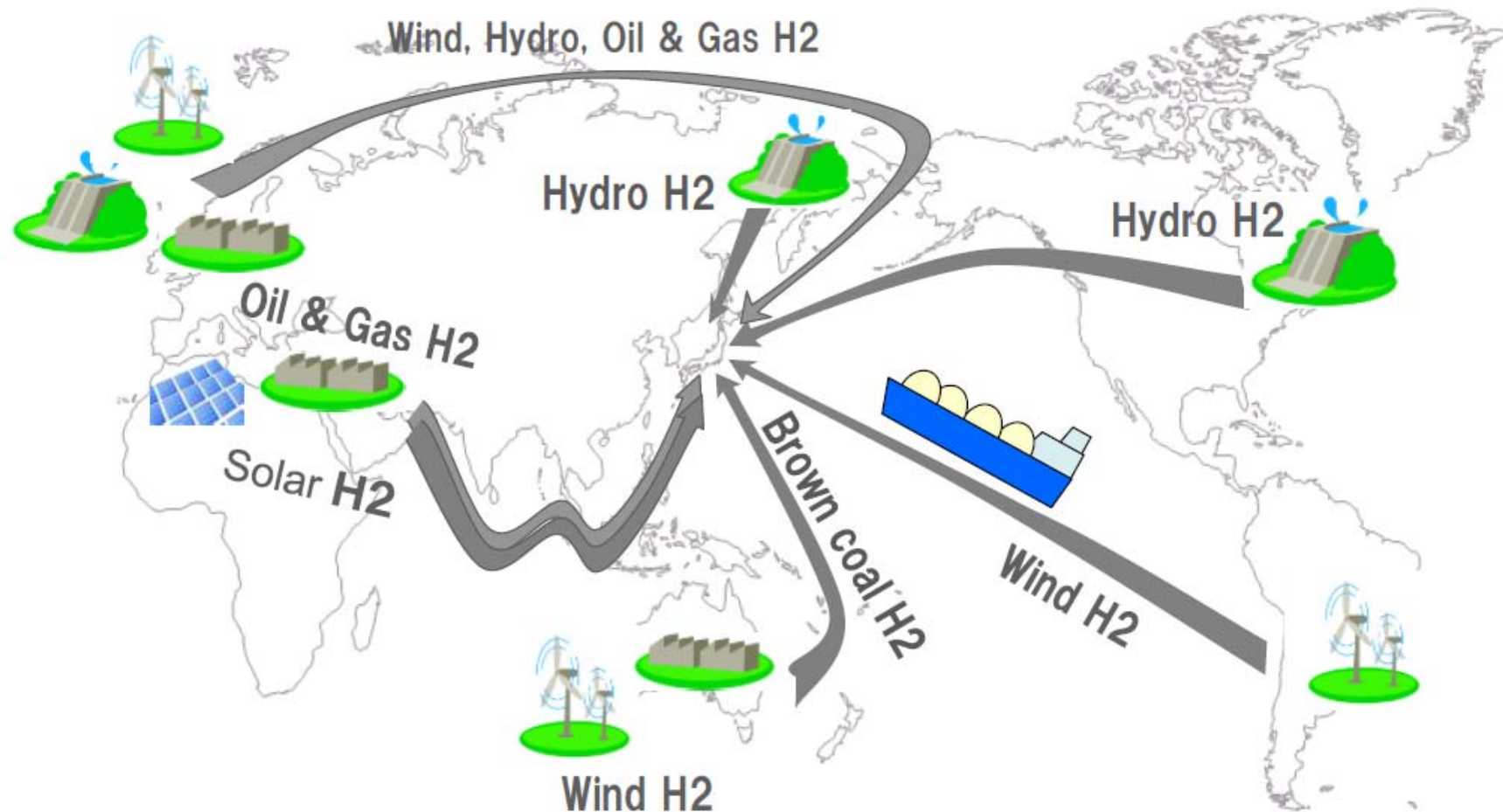


- Schott
 - Siemens
 - BASF
 - FLABEG
 - Alstom
 - ABB
 - KSB
 - MunichRe
 - Flowserve
 - Schneider
 - Krohne
 - WIKA
 - VEGA
 - GEA
 - Fichtner
- Receiver tubes
 - Turbine
 - Salt
 - Mirrors
 - HV busbars
 - Circuit breaker
 - Pumps
 - Insurance
 - Pumps and valves
 - Solar field control system
 - Rotameters, Flowmeters
 - Pressure gauges and temperature elements
 - Level transmitters
 - Condenser
 - Consultant

List may not be complete



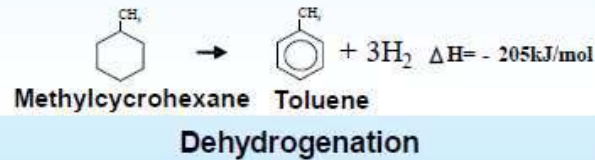
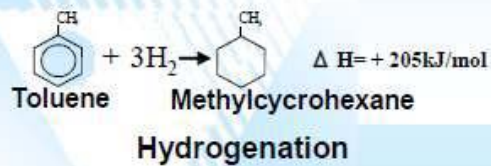
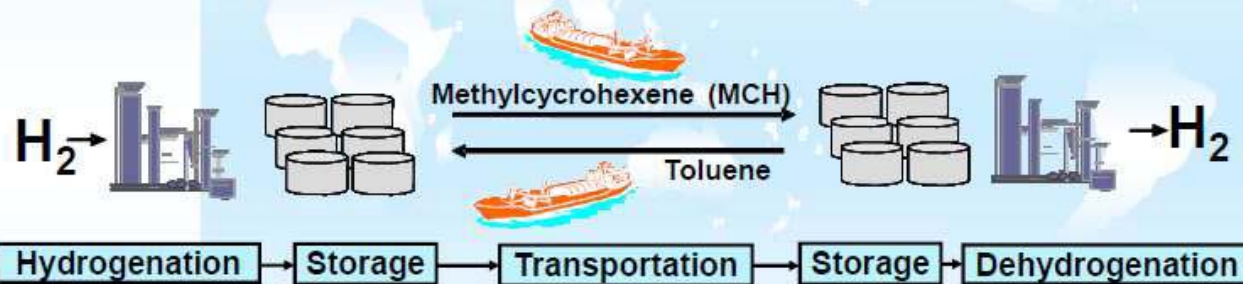
Kawasaki Vision – „Hydrogen Potential from Overseas“





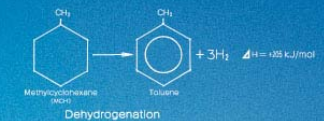
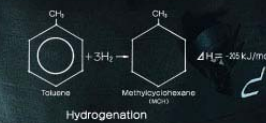
CHIYODA – Wasserstoff Vision

The Methylcyclohexene(MCH) is considered one of the safety and economical hydrogen carriers because of the storage and transportation in the liquid phase under the ambient temperature and pressure.



Two technologies defied conventional wisdom and made SPERA Hydrogen possible.

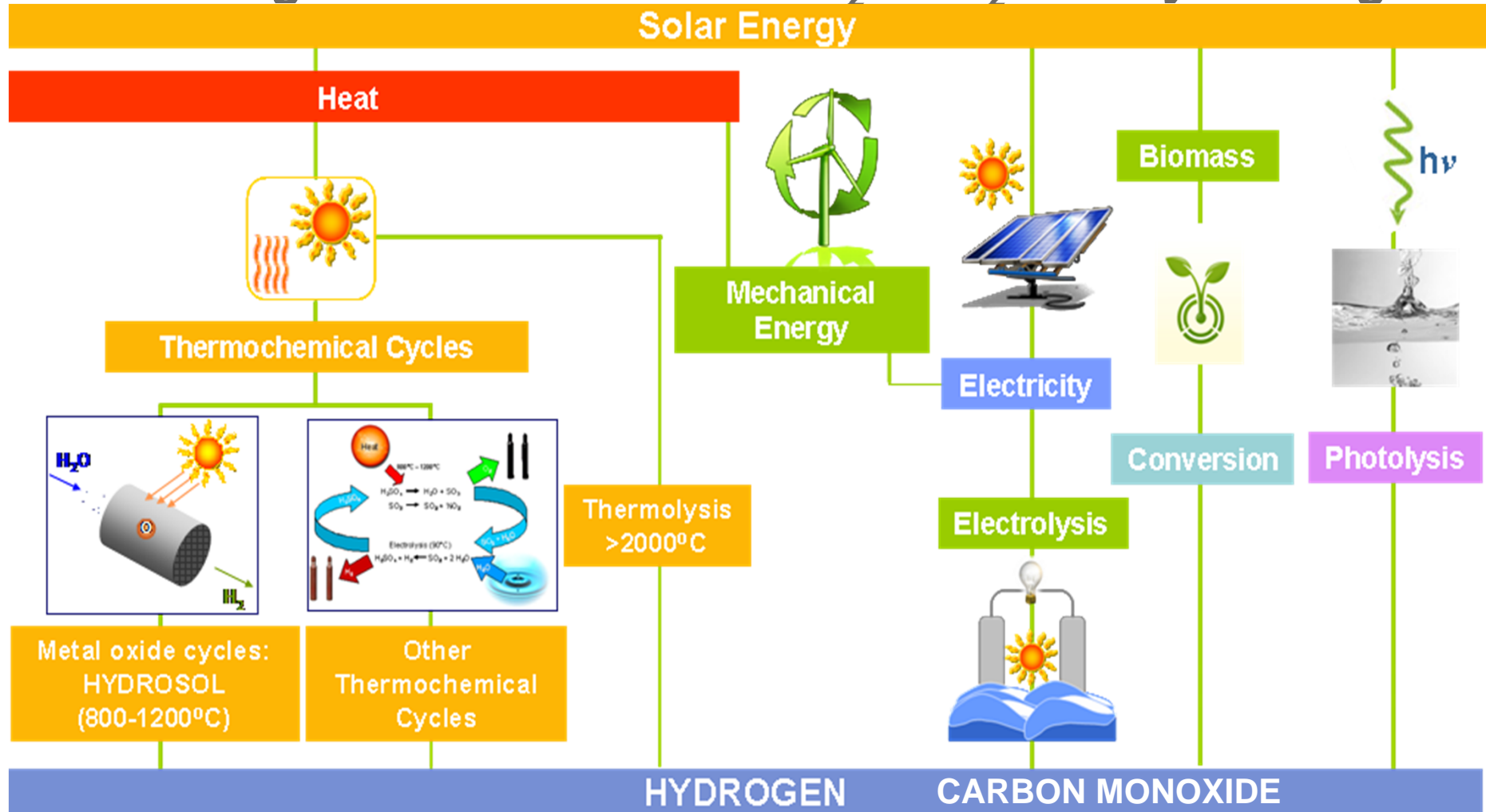
1 ~Organic Chemical Hydride (OCH) Technology~
 Enables the transport of hydrogen at ambient temperature and pressure.
 Fixing hydrogen to toluene, a major component of gasoline, produces a liquid called methylcyclohexane (MCH), which is easy to handle at ambient temperature and pressure. This is SPERA Hydrogen. Our technology facilitates storage of hydrogen in large quantities and long-distance transportation at a low cost because it eliminates the need for hydrogen (the lightest gas, difficult to store or transport under normal conditions) to be liquefied at cryogenic temperatures or pressurized in cylinders.



2 ~Dehydrogenation Catalyst~
 Extracts hydrogen from MCH.
 For some time, the extraction of hydrogen from methylcyclohexane (MCH) had been considered impossible. However Chiyoda Corporation developed a catalyst to achieve exactly that, by means of our proprietary nanotechnology. The catalyst makes it possible to supply just the right amount of hydrogen on demand at any time and any place.

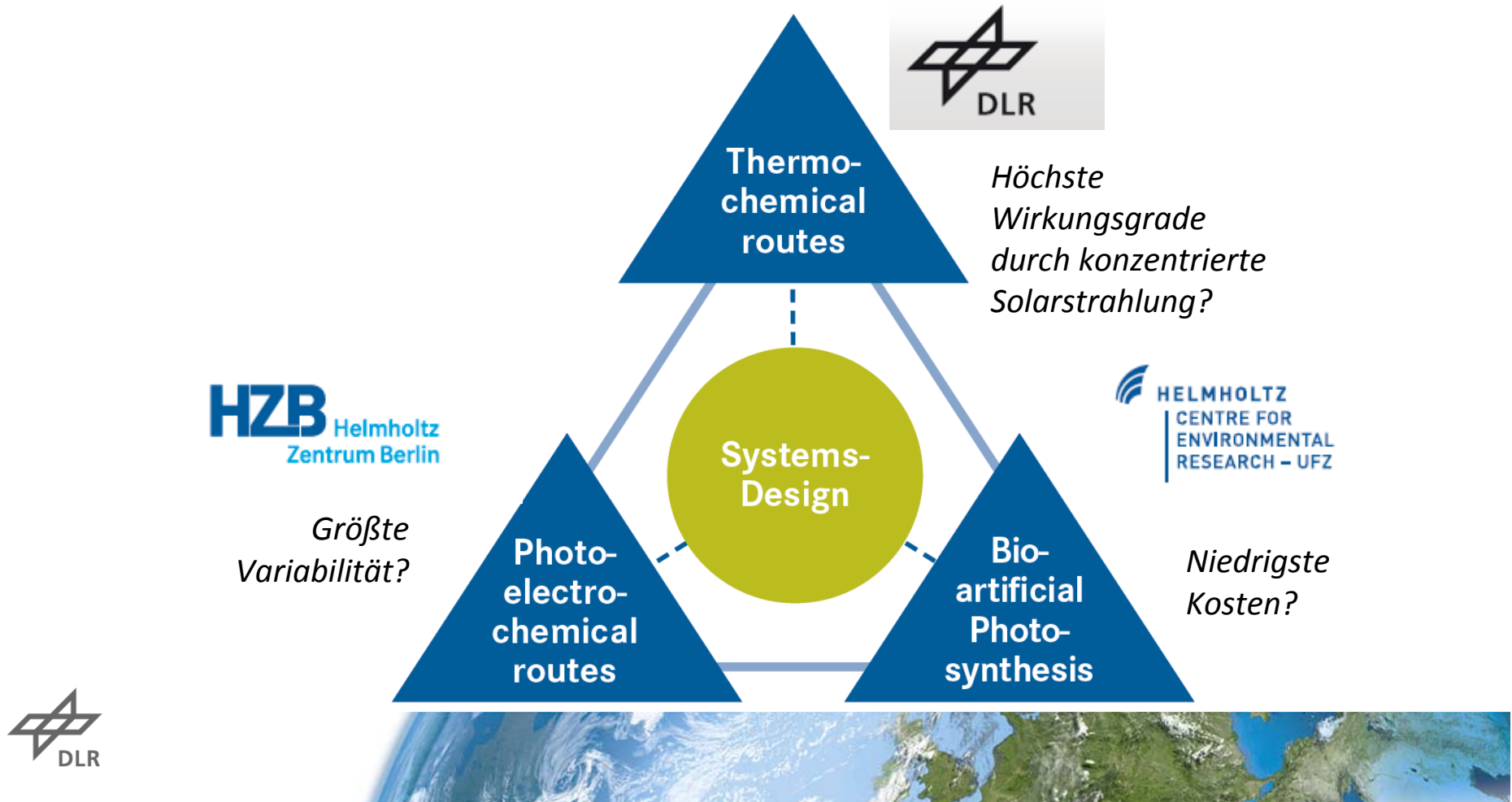


Solar Wege von Wasser oder CO₂ zu H₂ und Synthesegas



Helmholtz Strategie and „Solar Fuels“

Topic im Programm Erneuerbare Energien



Wirkungsgradvergleich der solaren Wasserspaltung (Siegel et al., 2013)*

Prozess	T [°C]	Solar plant	Solar- receiver + power [MW _{th}]	η T/C (HHV)	η Optical	η Receiver	η Annual Efficiency Solar – H ₂
Alkali-Elektrolyse (+CSP)	NA	Aktueller Solarturm	Salz 700	30%	57%	83%	13%
Dampfelektrolyse SOEC	850	Zukünftiger Solarturm	Partikel 700	45%	57%	76,2%	20%
Hybrider Schwefelsäure- prozess	850	Zukünftiger Solarturm	Partikel 700	50%	57%	76%	22%
Hybrider Kupfer- Chlor Prozess	600	Zukünftiger Solarturm	Salz 700	44%	57%	83%	21%
2 stufige Metaloxid Zyklen (CeO ₂ ,	1800	Zukünftiger Paraboloid	Partikel- reaktor < 1	52%	77%	62%	25%

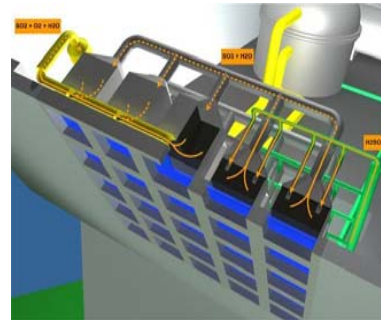
*N.P. Siegel, J.E. Miller, I. Ermanoski, R.B. Diver, E.B. Stechel, *Ind. Eng.Chem. Res.*, 2013, 52, 3276-3286.

CSF – Technische Optimierung in verschiedenen Dimensionen



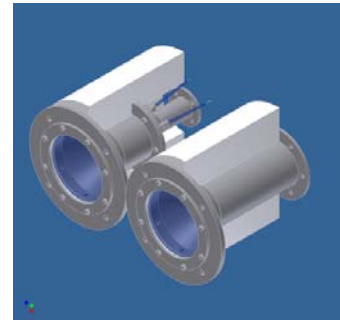
$10^4 - 10^2$ m
Solaranlage zur
Brennstoffproduktion

Bewertung von Standorten
Auslegung von Solarfeldern
Simulation von Anlagen
Bewertung von
Umwelteinflüssen



$10^2 - 10^1$ m
Receiver

Design
Simulation
Konstruktion
Test
Entwicklung



$10^1 - 10^{-2}$ m
Receiver-
komponenten

Material
Design
Wärme und
Stoffübertragung
Simulation
Test und Entwicklung



$10^{-2} - 10^{-8}$ m
reaktive Systeme

Simulation
Synthese
Chemische
Eigenschaften
Physikalische
Eigenschaften

Solar Türme, “Central Receiver Systems”



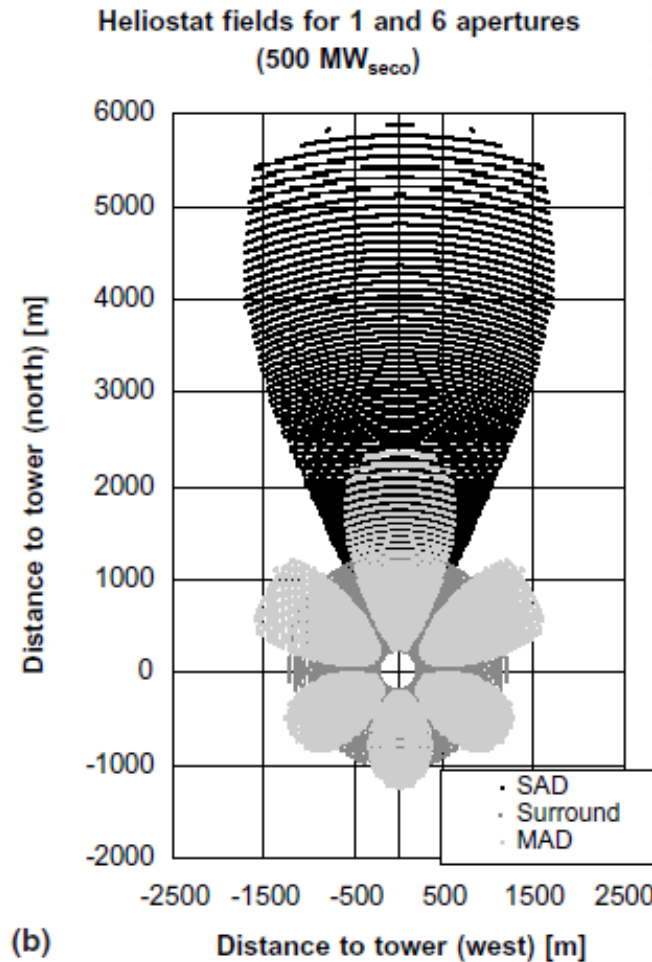
- PS10, Ivanpah, Torresol
- PSA CRS, CESA-1,
- Solar-Two, Daggett,



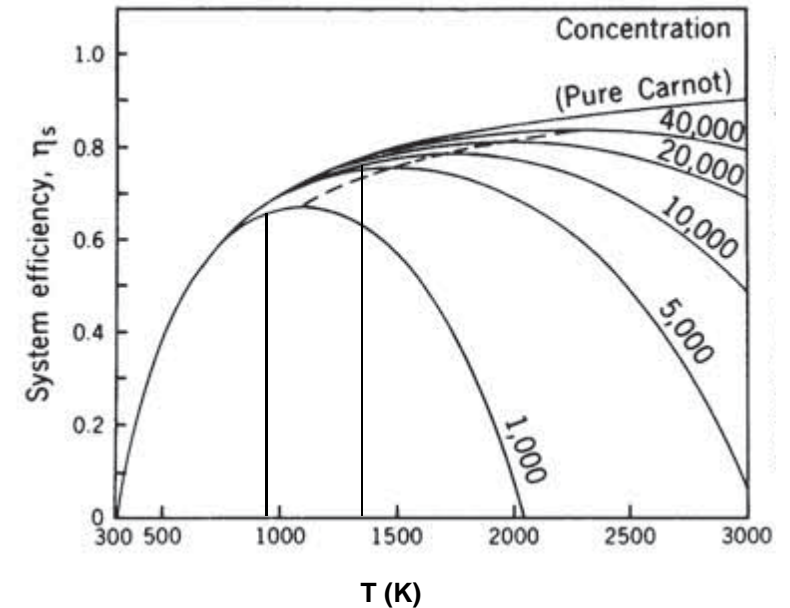
Solarfeld Entwicklung

Solarfelder müssen für ihre Anwendung optimiert werden:

- Standort
- Konzentration
- Sekundäroptiken



M. Schmitz et al., Solar Energy 80 (2006) 111–120.

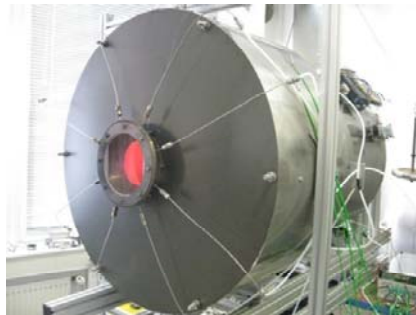


E.A. Fletcher, R.L. Moen, Science, 197 (1977) 1050-1056.

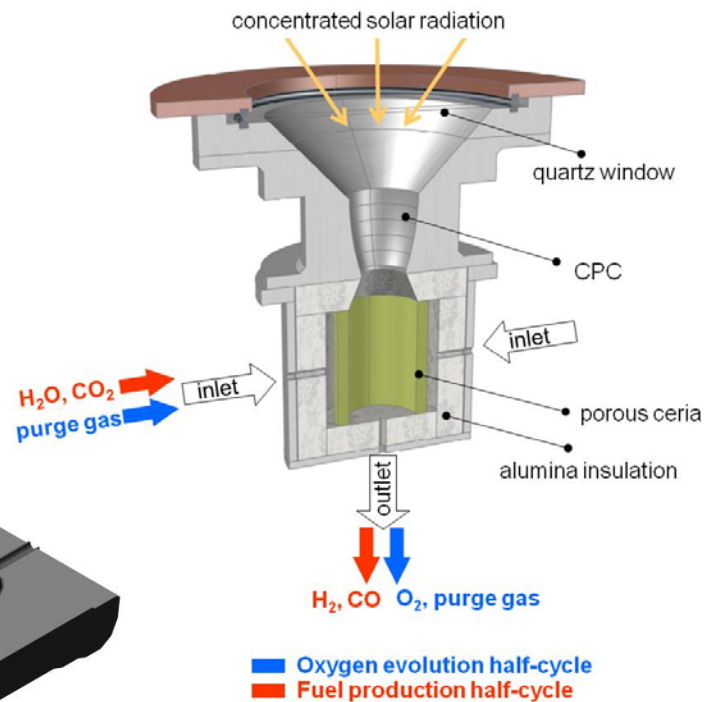
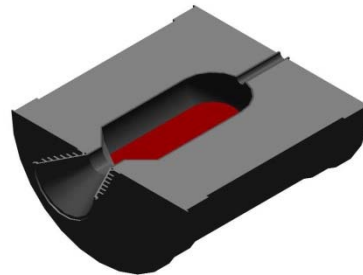


Receiver – Konzepte für die solarthermische Brennstoffherzeugung

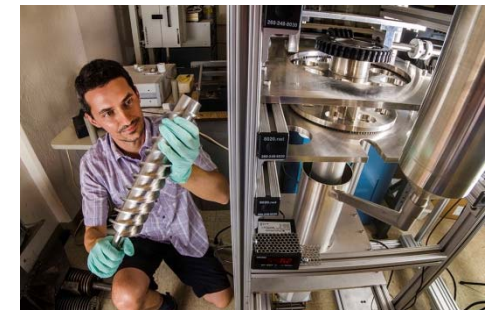
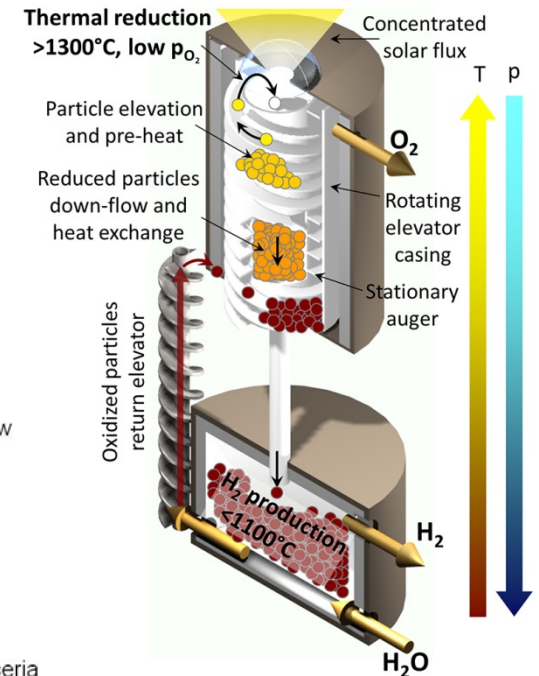
- Herausforderungen:
 - Sehr hohe Temperaturen
 - Korrosion
 - Abrieb
 - Prozessführung
- Ziele:
 - Wirkungsgradsteigerung
 - Langlebigkeit
 - Kosten



DLR Project
Solar beheizter Drehtrommelofen



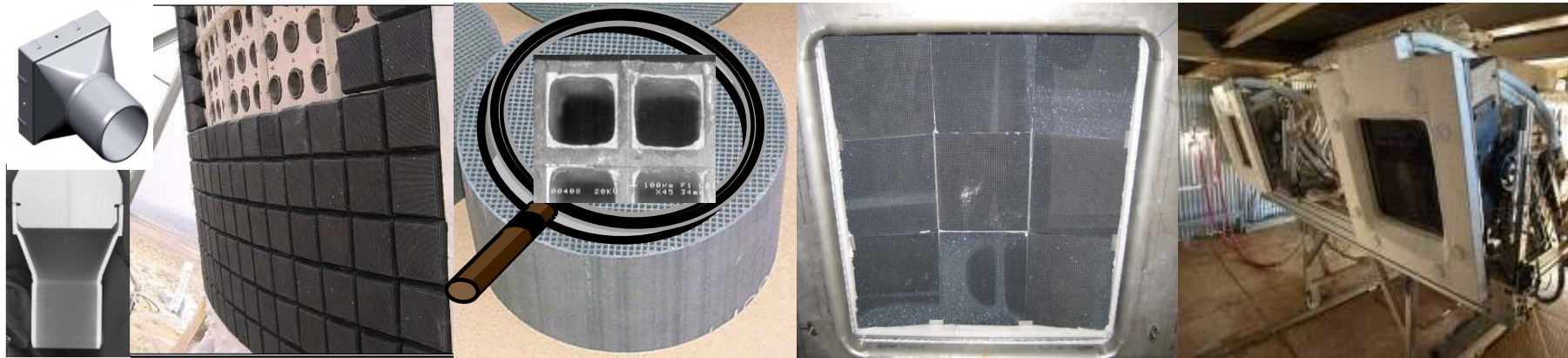
Europäisches Projekt
Solar beheizter Cavity-Gas
Receiver mit poröser
keramischer Struktur
A. Steinfeld et al., ETH Zürich



US- DoE Projekt mit DLR
Solar beheizter Partikelreceiver
I. Ermanoski et al., Sandia Natl. Lab.



Solarreceiver: Komponenten und reaktive Systeme



C. Agrafiotis, M. Roeb, A.G. Konstandopoulos, L. Nalbandian, V.T. Zaspalis, C. Sattler, P. Stobbe, A.M. Steele, Solar water splitting for hydrogen production with monolithic reactor, *Solar Energy*, 79(4), 409-421, (2005).

Reaktive beschichtete Strukturen und Strukturen aus reaktivem Material

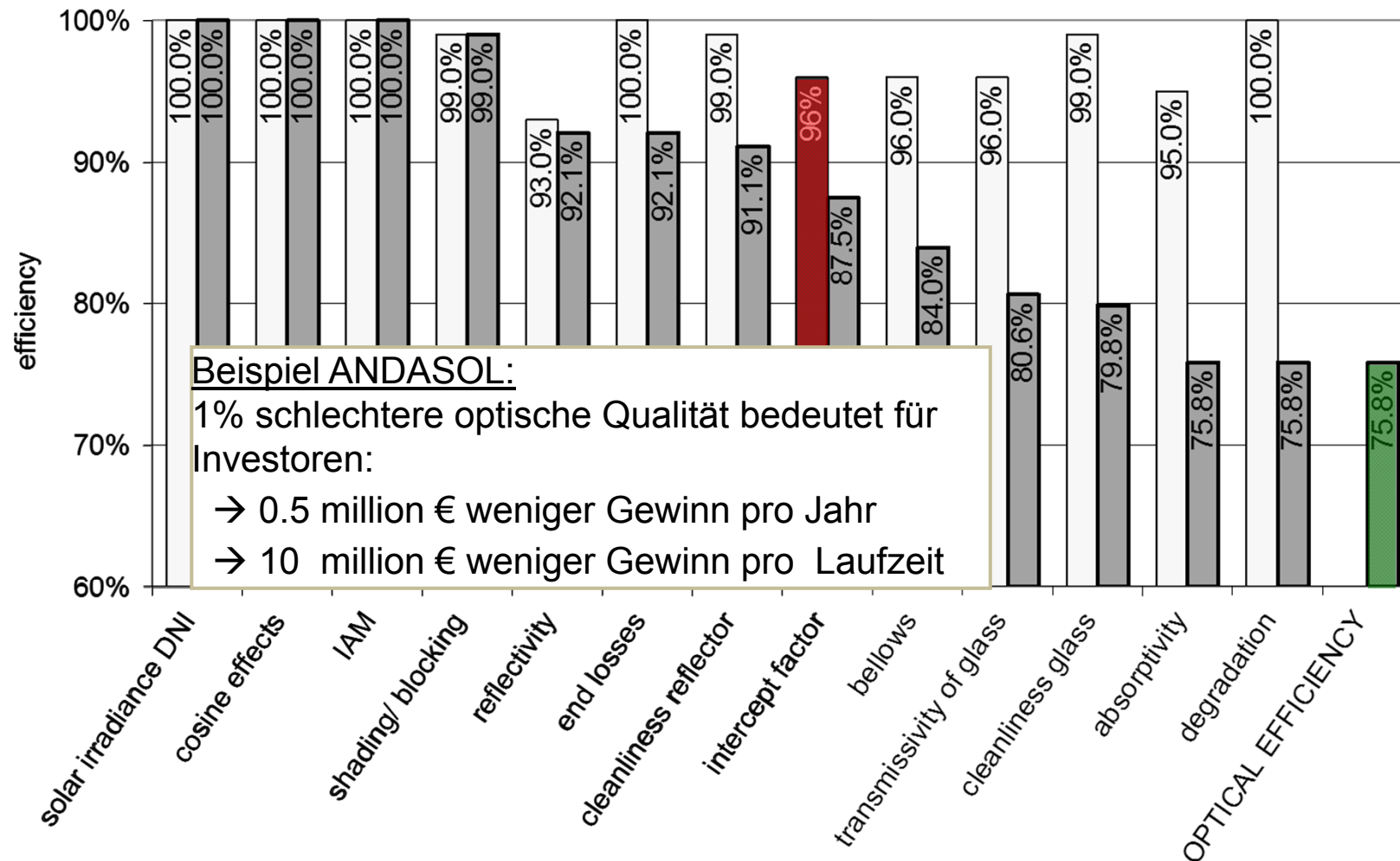


P. Furler, J. Scheffe, M. Gorbar, L. Moes, U. Vogt, A. Steinfeld, Solar Thermochemical CO₂ Splitting Utilizing a Reticulated Porous Ceria Redox System, *Energy & Fuels*, 26(11), 7051-59, (2012).



Qualifizierung von Anlagen

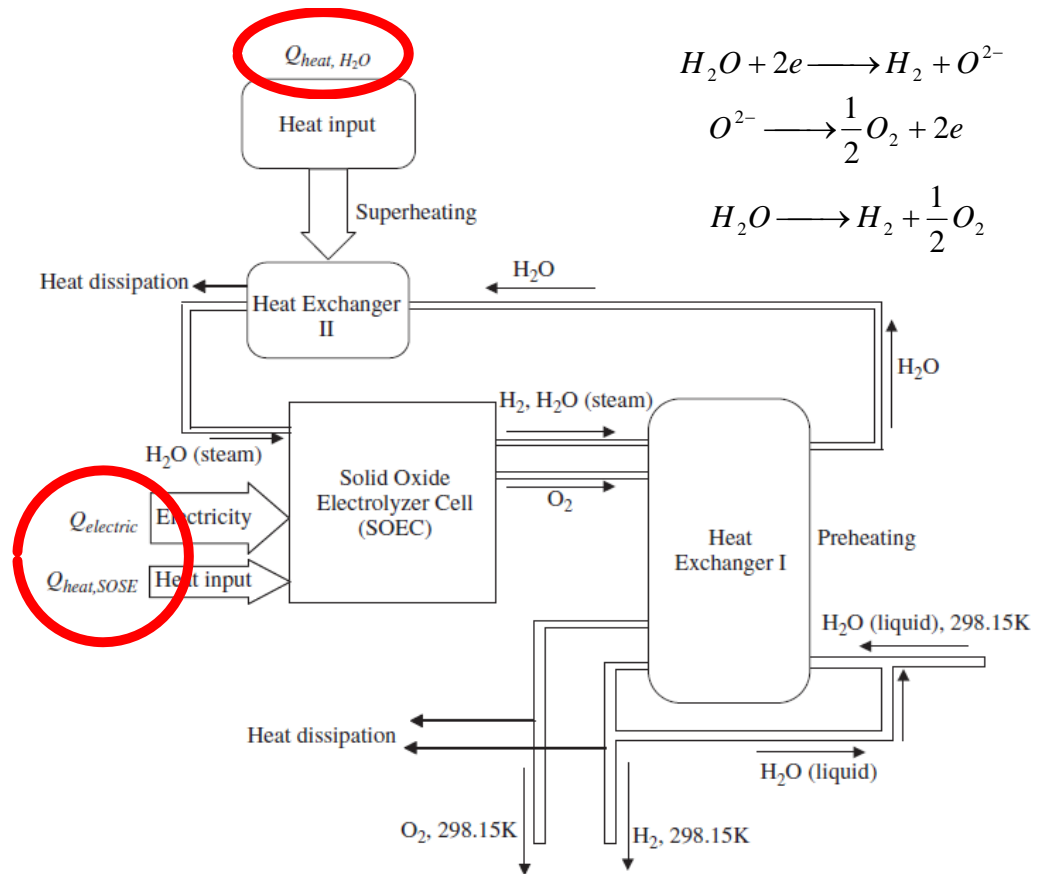
Beispiel: Wirkungsgradkette einer Parabolrinne



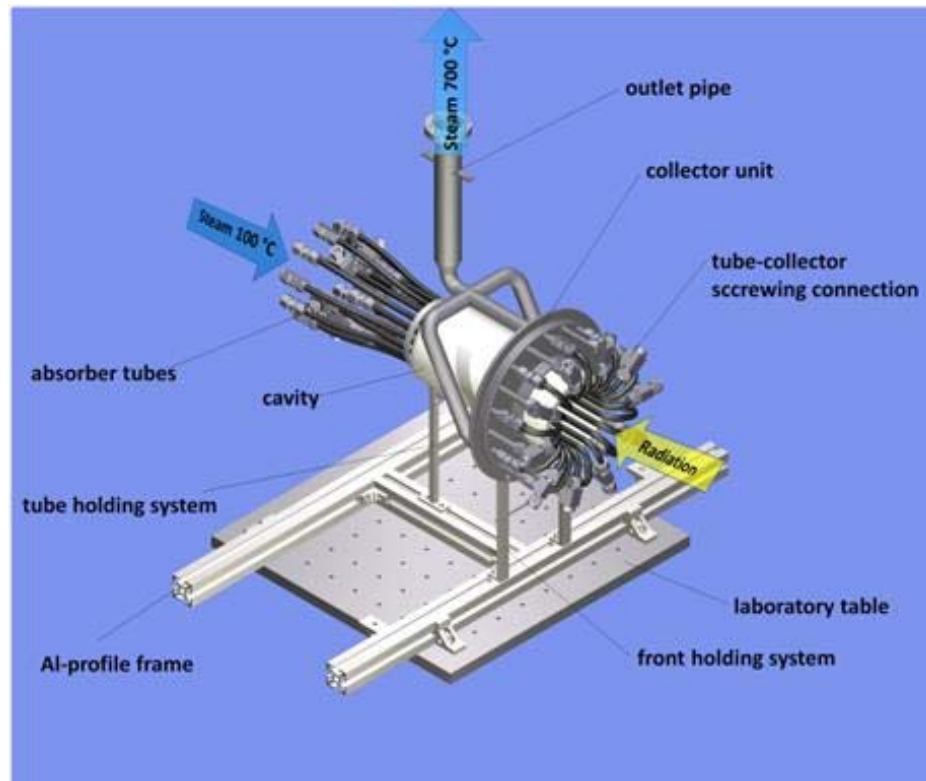
Hochtemperatur Dampfelektrolyse

www.sophia-project.eu

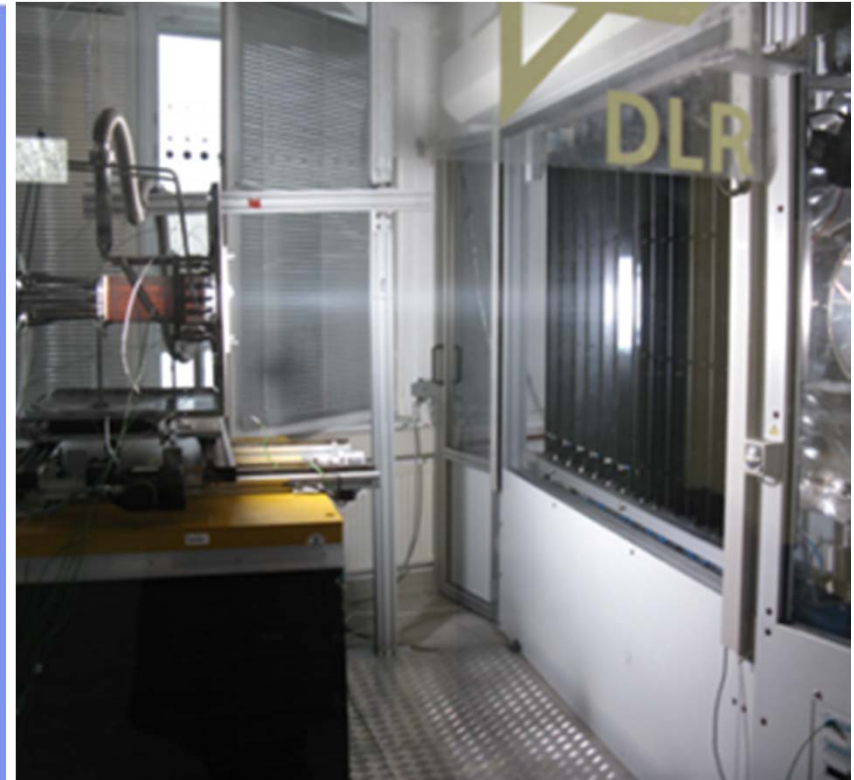
- Temperaturbereich 600° C to 900° C zum Betrieb der Elektrolyse
- Einkopplung von solarthermischem Strom und Wärme
- Abwärme der Produkte H_2 und O_2 werden zusätzlich zur Wasserverdampfung genutzt



Solar Dampfüberhitzer für die SOEC



3D Design

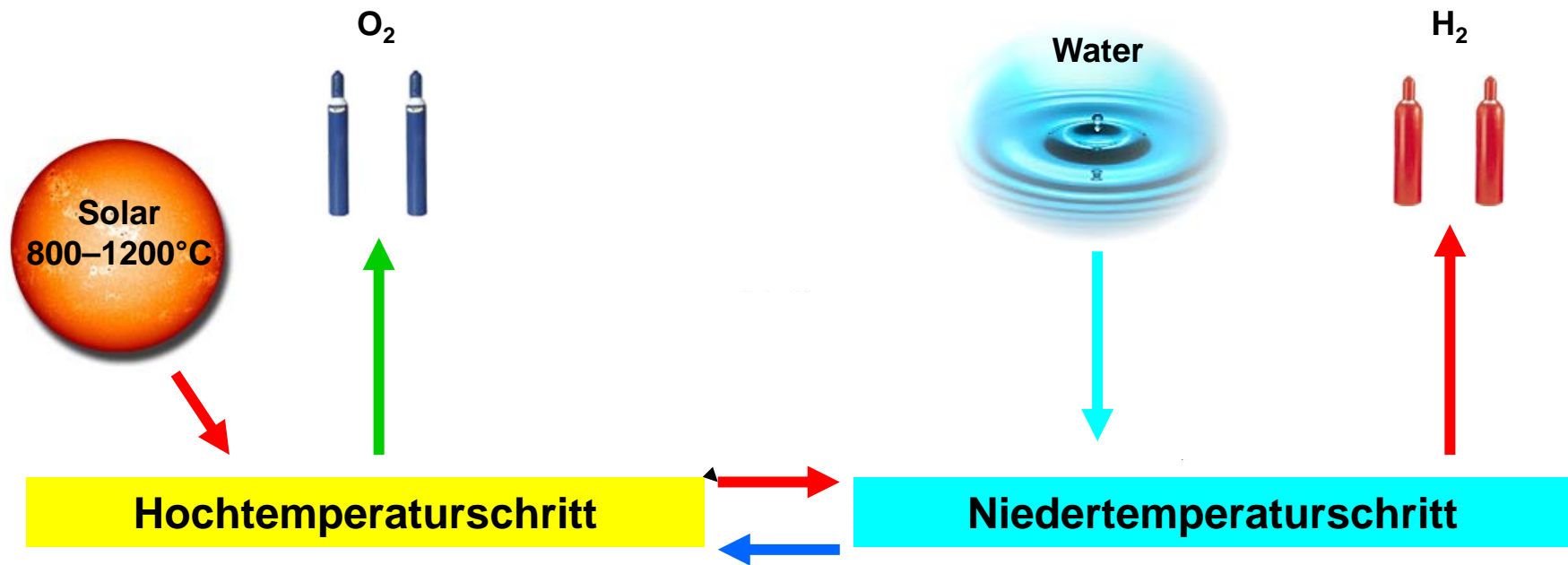


Betrieb im Hochleistungsstrahler
5 kg/h Dampf, 700 °C





Hybrider Schwefelsäureprozess (HyS, Westinghouse)

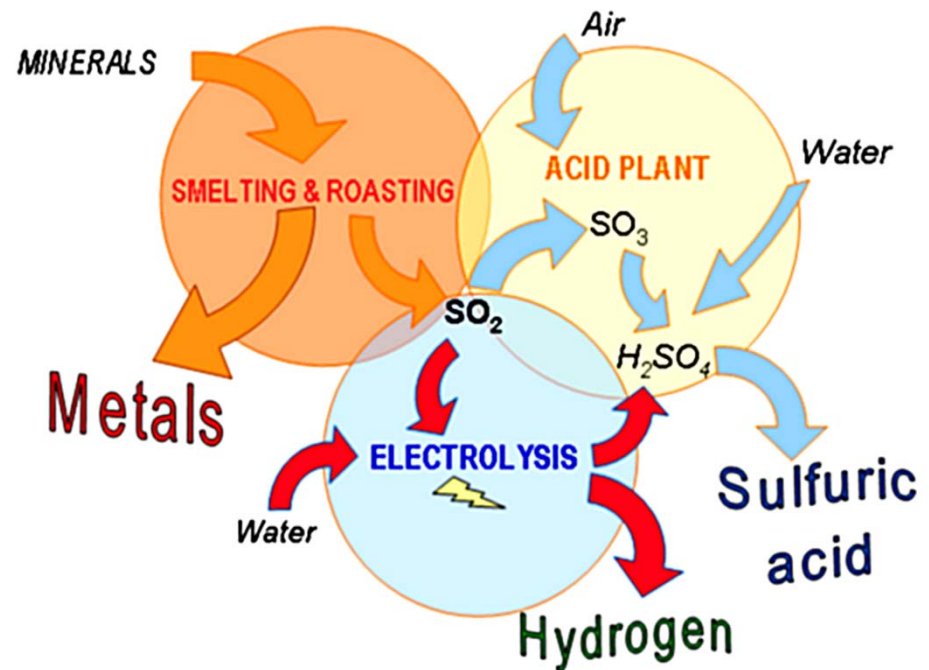




SOL2HY2 – „Solar To Hydrogen Hybrid Cycles“

- FCH JU Projekt
- Solarbeheizte Nutzung von SO_2 aus der Erzhüttung zur Co-Produktion von H_2 und Schwefelsäure
- Hybridisierung durch den Einsatz von erneuerbarem Strom für die Electrolyse
- Partner: EngineSoft (IT), Aalto University (FI), DLR (DE), ENEA (IT), Outotec (FI), Erbicor (CH), Oy Voikoski (FI)
- >100 kW Demonstrator wird gerade auf dem Solarturm in Jülich aufgebaut

Outotec™ Open Cycle (OOC)

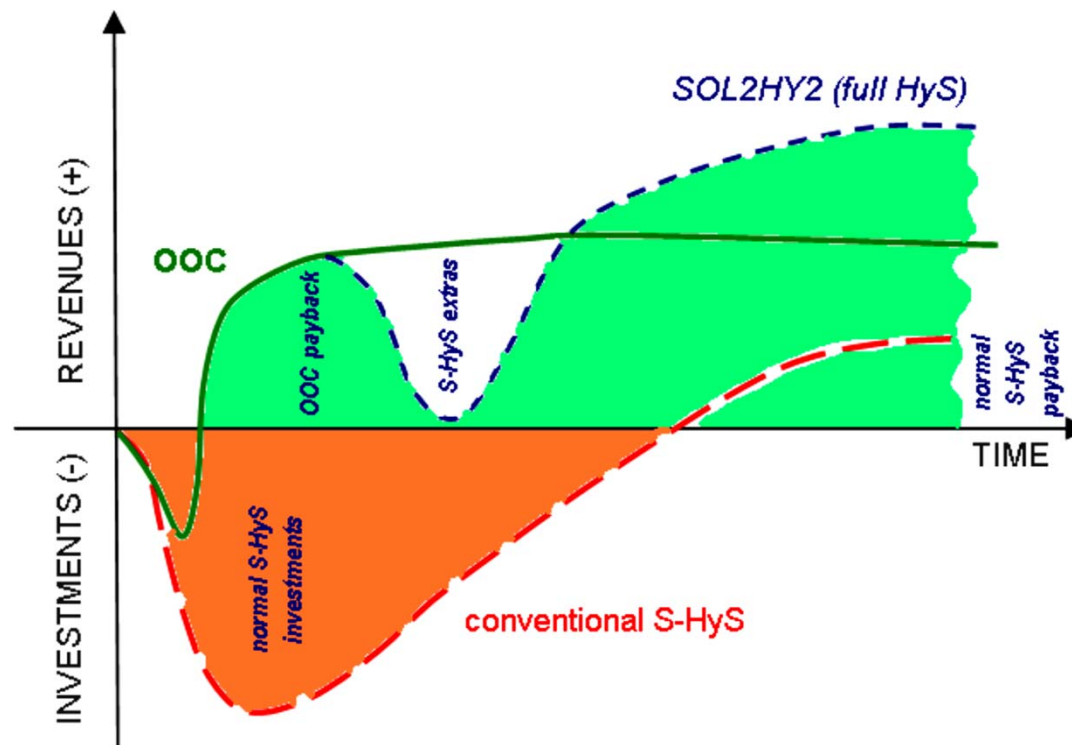


<https://sol2hy2.eurocoord.com>





Investitionen vs. Gewinne

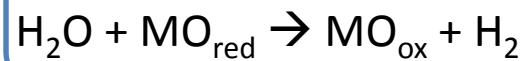


- Geringere Startinvestitionen
- Finanzierung der Hybridisierung durch die Gewinne aus dem OOC
- Erhöhung der Gesamtgewinne

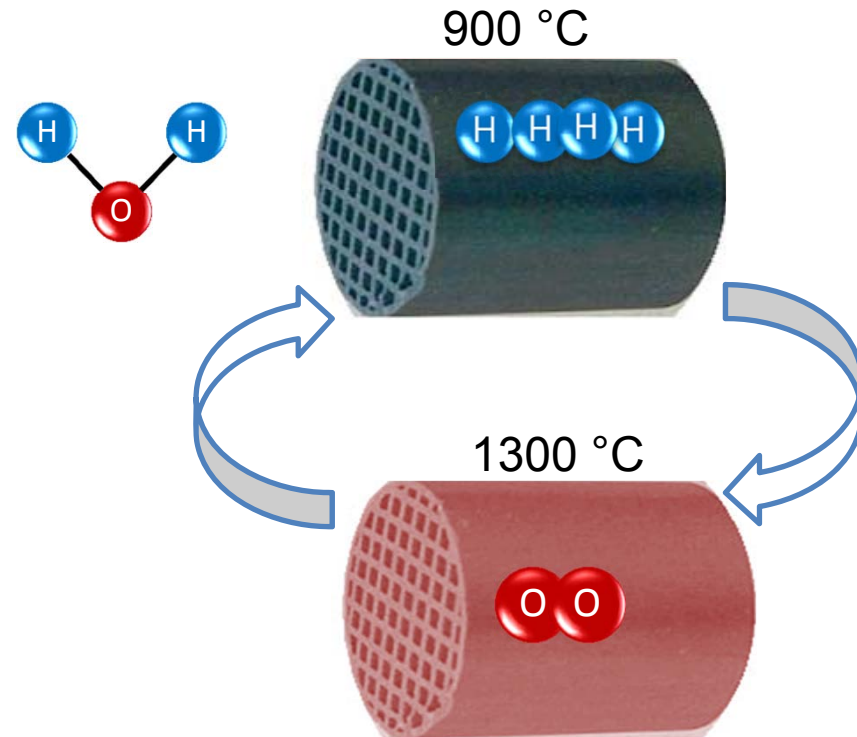


Beispiel einer langfristigen Technologieentwicklung: HYDROSOL

1. Wasserspaltung



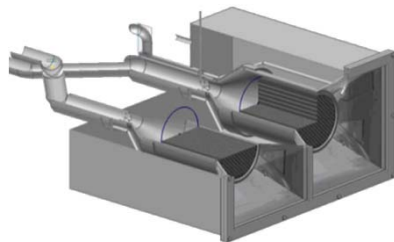
2. Regeneration





HYDROSOL Entwicklung

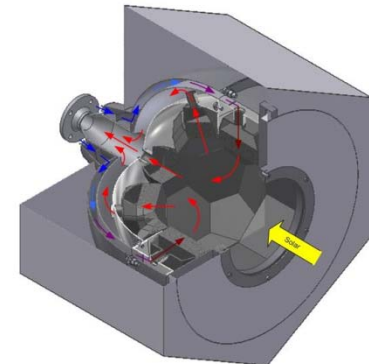
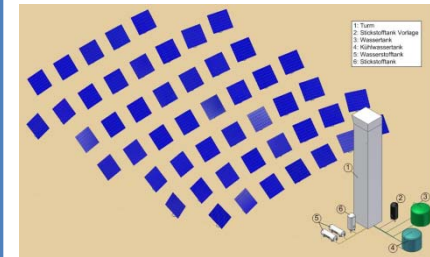
Hydrosol I
2002 – 2005
< 10 kW



Hydrosol II
2006 – 2009
100 kW



Hydrosol 3D
2010 – 2012
1 MW



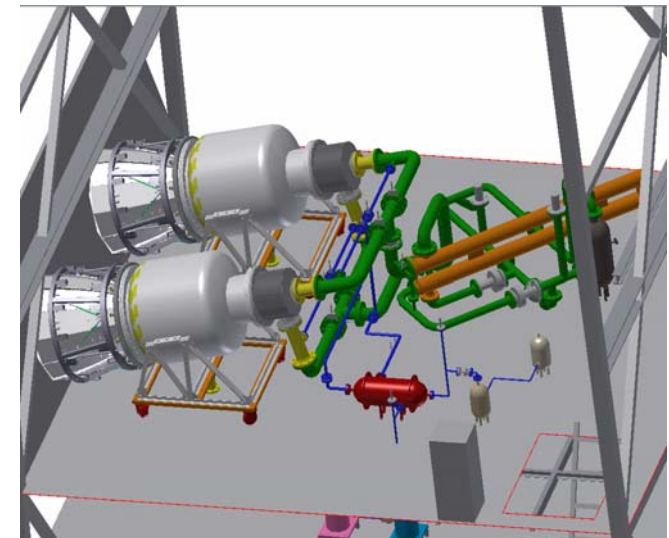
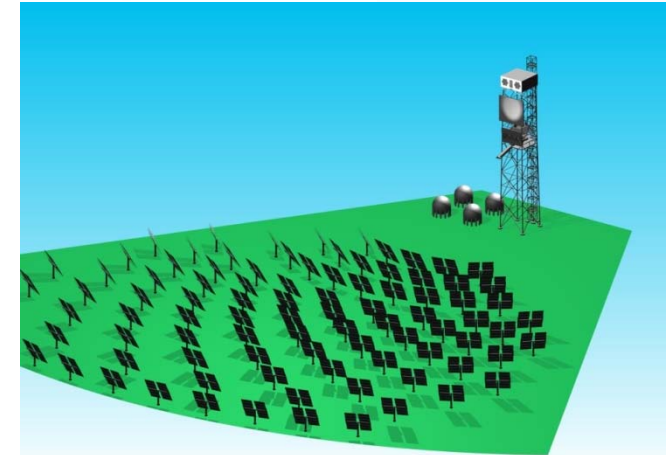
Hydrosol Plant

Demonstration auf dem CRS Turm PSA, Spanien



- Europäisches FCH-JU Projekt
- Partner: APTL (GR), HELPE (GR), CIEMAT (ES), HYGear (NL)
- 750 kW_{th} Demonstration der thermochemischen Wasserspaltung
- Standort: Plataforma Solar de Almería, Spanien, CRS Feld und Turm
- Wasserstoffaufbereitung und –speicherung
- Einweihungsevent Sommer 2016

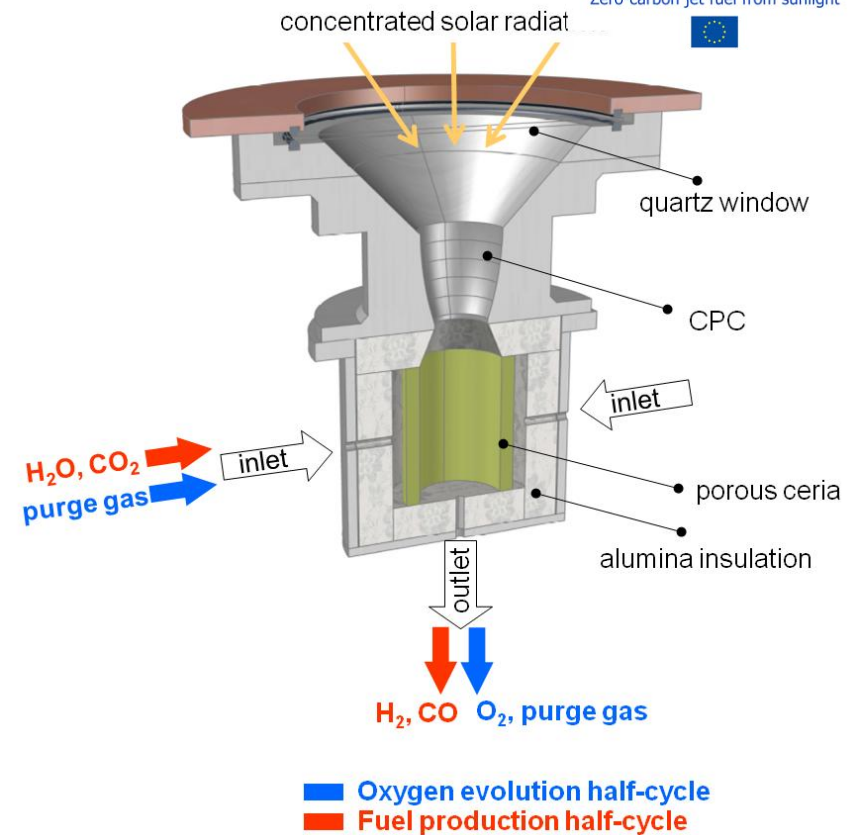
<http://hydrosol-plant.certh.gr/>



Solarthermische H₂O/CO₂-Spaltung

Solare Produktion von Kerosin

- EU-FP7 Project SOLAR-JET (2011-2015)
- Erforschung des Potentials der solarthermischen Produktion von Flugbenzin aus CO₂ und Wasser.
- Optimierung des zweistufigen CeO thermochemischen Kreisprozesses zur Synthesegaserzeugung aus CO₂ und Wasser mit einem höheren solar-zu-Brennstoff Umwandlungswirkungsgrad als aktuelle bio- und andere solare Brennstoffprozesse.
- **2014: Herstellung des ersten Flugbenzins durch Fischer-Tropsch (FT) Synthese aus solar produzierten Synthesegas!**



Int. J. Heat & Fluid Flow 29, 315-326, 2008.
Materials 5, 192-209, 2012.

Partners: Bauhaus Luftfahrt (D), ETH (CH),
DLR (D), SHELL (NL), ARTTIC (F)
Funding: EC

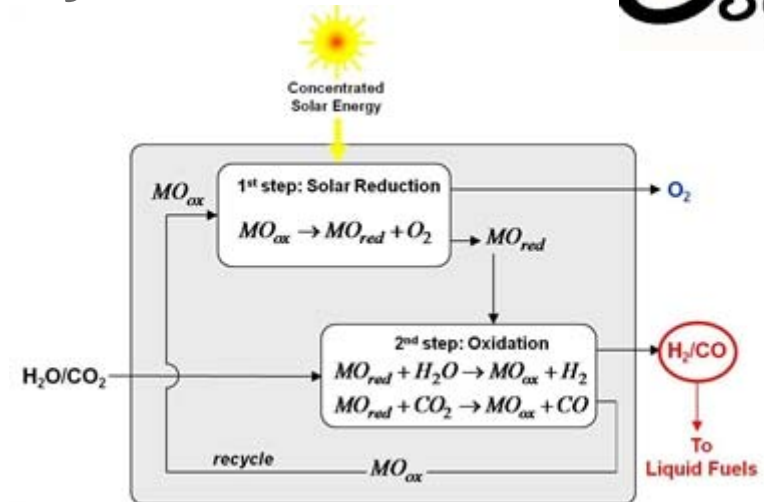
<http://www.solar-jet.aero/>





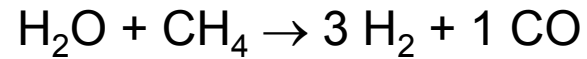
HGF Virtuelles Institut SolarSynGas

- Effiziente und wirtschaftliche thermochemische Erzeugung von Brennstoffen über Synthesegas aus erneuerbaren Rohstoffen und Energiequellen
- Partner: DLR, KIT, TU Clausthal, ETH Zürich

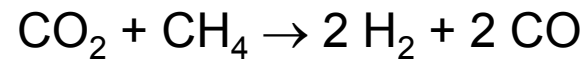


Solare Erdgasreformierung

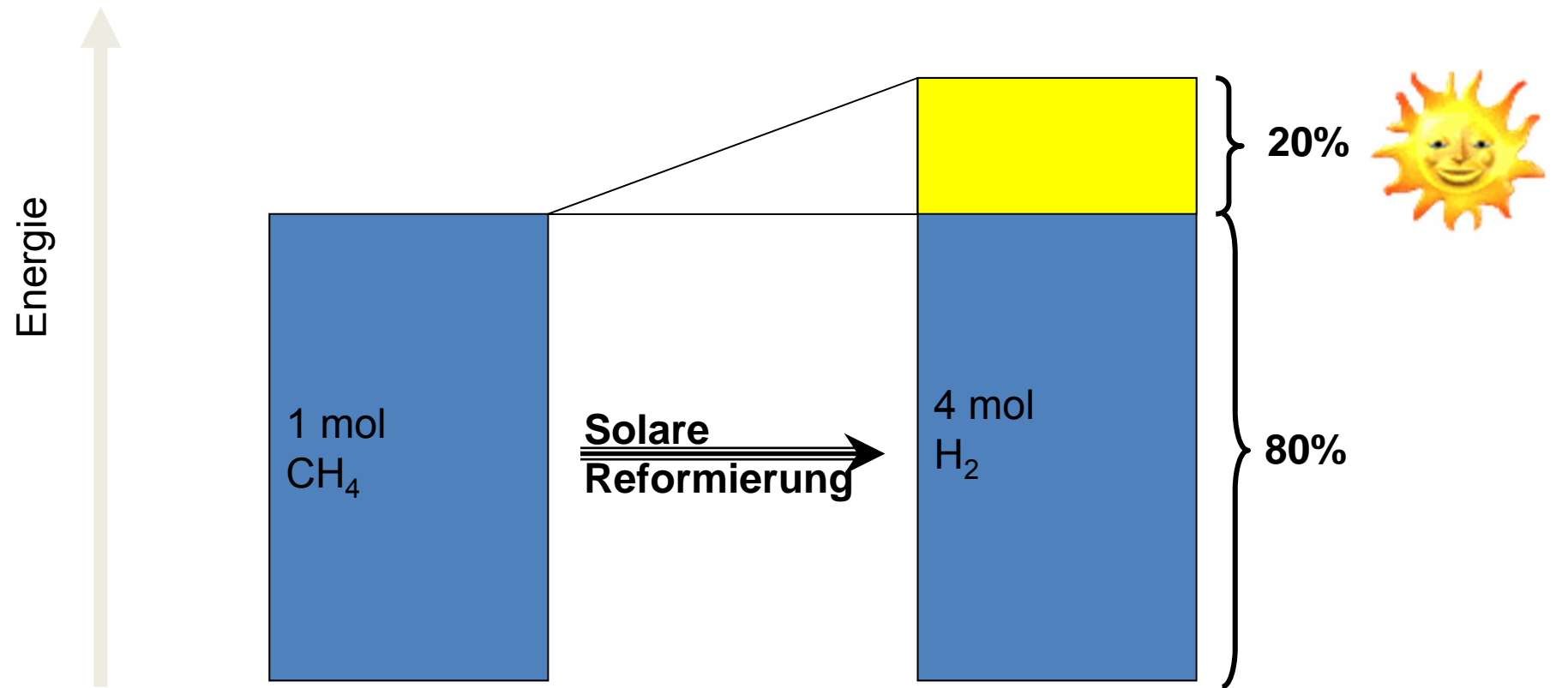
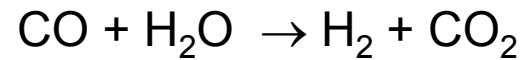
Dampfreformierung:



CO₂ Reformierung (trocken):

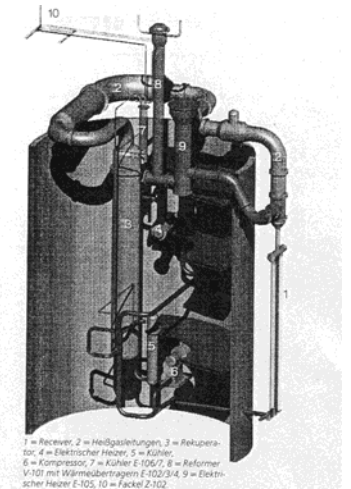
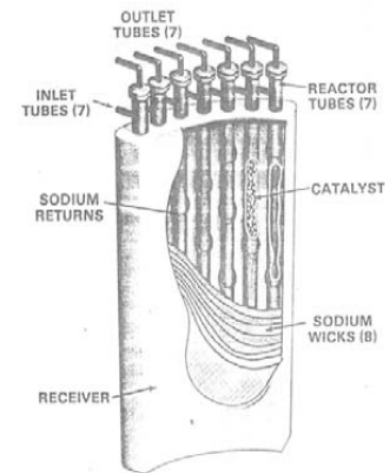
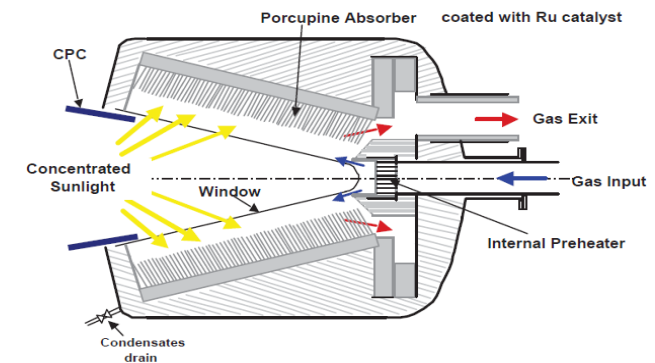


Wasser/Gas Shift:



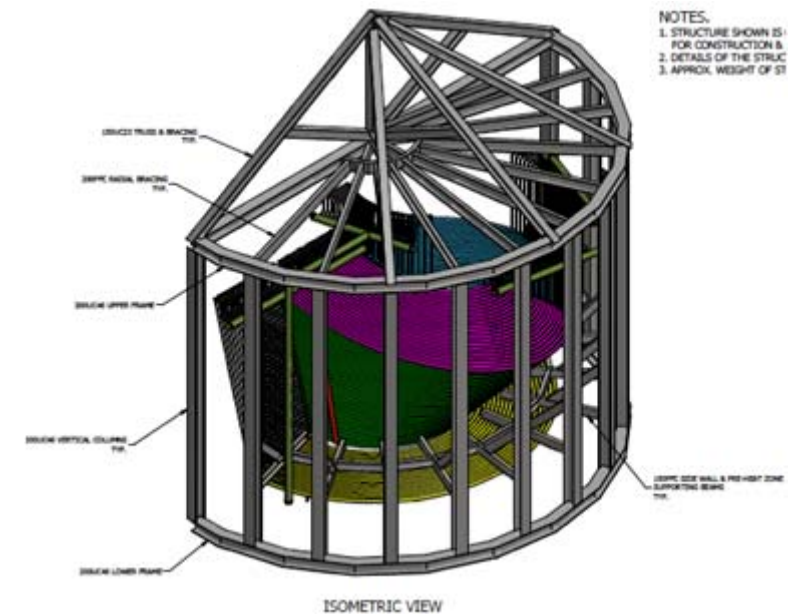
Solare Erdgasreformierung

- Sodium reflux solar reformer (Sandia, WIS, 1983/4)
- 180 kW ASTERIX (DLR, CIEMAT 1988-1990)
- CAESAR (DLR, Sandia, 1987-1990)
- 480 kW direct irradiated reactor (WIS, 1992)
- 5-20 kW tubular (CSIRO, 1999-2002)
- 400 kW SOLASYS (DLR, WIS, Ormat, STORK, ECN, 1998-02)
- 20 kW Porcupine (Israel, approx 2005)
- 400 kW SOLREF (DLR, CRT, ECN, WSI, Johnson Matthey, HyGear, SHAP, 2004-09)
- 250 kW tubular (CSIRO, 2006-10) Indirect Systems
- 600 kW indirect (CSIRO, 2011-13)
- Storage/Membrane (CSIRO 2012-)
- Molten Salt /Membrane(Chiyoda/ENEA)



Scale-up der solaren Erdgasreformierung

- Australisches Solar Fuels Programm
- CSIRO entwickelt größere Reformer
- Geplante 15 MW Demonstration im Outback



ISOMETRIC VIEW



Robbie McNaughton, CSIRO, Australien





Luft

Raketentreibstoff

Wasser

Speichermaterialien

Ammoniak

Dünger

Kunststoffe

Treibstoff



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!